

Kajian Pengaruh Abu Vulkanik Terhadap Batu Candi Borobudur

Nahar Cahyandaru, Ari Swastikawati, Henny Kusumawati

Balai Konservasi Borobudur, Jl. Badrawati, Borobudur, Magelang 56553

Email : nhrcahyandaru@yahoo.com

Abstrak: Candi Borobudur berada di kawasan yang dikelilingi oleh gunungapi, salah satunya yang sangat aktif adalah gunung Gunung Merapi. Erupsi besar yang terjadi pada Oktober-November 2010 menghasilkan material erupsi yang sangat banyak. Salah satunya adalah abu vulkanik yang tersebar jauh dan jatuh ke wilayah lain yang luas termasuk menutupi kawasan Borobudur. Abu vulkanik yang menutupi Candi Borobudur dari erupsi tahun 2010 secara umum telah berhasil dibersihkan. Sisa abu vulkanik yang telah masuk ke sela-sela batu dan saluran drainase juga telah ditangani. Namun masih diperlukan kajian untuk mengetahui dampak yang telah terjadi maupun yang kemungkinan dapat terjadi di masa yang akan datang. Tujuan yang hendak dicapai dalam pelaksanaan studi ini adalah untuk mengetahui dampak abu vulkanik secara langsung terhadap candi yang diobservasi secara visual (berdasar pengamatan langsung). Tujuan kedua adalah untuk mengetahui dampak abu vulkanik yang diobservasi pada permukaan batu yang dibiarkan tertutup abu vulkanik pada jangka waktu yang lama. Selanjutnya adalah untuk mengetahui dampak abu vulkanik terhadap perubahan mineralogi dan kimiawi batu andesit di laboratorium. Dan yang terakhir adalah untuk mengetahui dampak aktivitas gunung api terhadap beberapa cagar budaya berbahan batu andesit.

Metode yang dilaksanakan meliputi beberapa tahap yang masing-masing dilaksanakan secara terpisah. Pertama pengamatan dampak abu vulkanik terhadap permukaan batu candi secara visual langsung dengan wawancara beberapa orang yang sering berada di candi sebelum, selama erupsi, selama penanganan, dan setelah selesai penanganan. Tahap selanjutnya adalah pengamatan batu yang dibiarkan tertutup abu vulkanik dengan cara diamati setiap 6 bulan. Berikutnya adalah percobaan laboratorium dengan perendaman batu dalam larutan abu vulkanik dan larutan asam sulfat untuk simulasi, serta analisis laboratorium. Untuk mengetahui dampak material gunung api terhadap beberapa candi andesit yang pernah terkena dampak langsung dilakukan studi banding dan observasi lapangan.

Kesimpulan yang dapat diambil pada kajian ini adalah permukaan batu Candi Borobudur yang diobservasi secara visual tidak mengalami perubahan yang signifikan akibat dampak erupsi Gunung Merapi. Permukaan batu yang dibiarkan tertutup abu vulkanik setelah diobservasi menunjukkan tidak mengalami perubahan kenampakan, warna, maupun kekerasan permukaan setelah observasi 6 bulan dan 12 bulan. Hasil simulasi di laboratorium dengan cara merendam sampel batu andesit dalam larutan abu vulkanik menunjukkan tidak mengalami perubahan yang signifikan secara mikroskopis, kimia, dan petrografi (mineralogi). Simulasi dengan larutan asam sulfat berbagai konsentrasi menunjukkan batu mengalami perubahan kimia, mikroskopis, dan mineralogi pada pH 3, dan mulai menampakkan perubahan pada pH 4. Pada pH di atas 4 serta dalam larutan abu vulkanik tidak mengalami perubahan. Hasil observasi lapangan terhadap beberapa candi yang pernah terkena dampak material erupsi gunung merapi menunjukkan tidak adanya dampak pelapukan material yang signifikan.

Kata kunci : Candi Borobudur, abu vulkanik, batu andesit, pelapukan batu

Abstract: Borobudur Temple is located in a region surrounded by volcanoes, one of them is Merapi, which are the most active volcano among the others. Big eruption happened at October-November 2010, producing huge amount of volcanic materials. One of them is volcanic ash that was spread far and fell on wider region including Borobudur area. Volcanic ash that covered Borobudur Temple in 2010 eruption, generally, has been cleaned successfully. The rest of the volcanic ash that entered the stone gaps and drainage system has been handled. Nevertheless, a study of the volcanic ash impact on present and long term is needed. The aim of this study is to know the direct impact of volcanic ash observed visually (based on direct observation). The second aim is to find out the impact of volcanic ash observed on the stone surface that is covered by volcanic ash in a long term. Next is to know the influence of volcanic ash on mineralogical and chemical shift happened on andesite stone in the laboratory. The last aim is to know the impact of volcanic activities on several andesite stone-heritages.

The methodology conducted consists of several steps, each is performed separately. First step is the visual observation on the stone surface, done by interviewing several persons who are often at the temple before, during and after the eruption, during and after the measures. The next step is the observation of stone covered by volcanic ash every 6 months. It is then followed by laboratory testing to perform simulation by soaking the stone

in a volcanic ash and sulfuric acid solution, as well as laboratory analysis. In finding the direct impact of volcanic activities in andesite stone-temples, field observation was conducted.

The conclusion of this study is that surface of the stone in Borobudur Temple that is observed visually does not experience significant shift due to Merapi Volcano eruption. The covered stone's surface does not show any shift on appearance, color, as well as hardness after 6 and 12 months observation. The result of laboratory simulation by immersing andesite stone samples in volcanic ash solution does not show any significant shift microscopically, chemically, and petrographically (mineralogically). Simulation using sulfuric acid solution in several concentrations shows that the stone experiences chemical, microscopic and mineralogical shift on pH 3, the shift start to appear in pH 4. On pH 4 and above as well as volcanic ash solution, the stone does not show any shift. The result of field observation on several temples that has been impacted by volcanic eruption material does not show any significant material degradation.

Keywords : Borobudur Temple, volcanic ash, andesite stone, stone degradation

I. PENDAHULUAN

A. Latar belakang

Borobudur merupakan salah satu kekayaan budaya bangsa Indonesia yang memiliki nilai penting yang sangat tinggi. Borobudur berada di dataran Kedu yang dikelilingi oleh gunung dan perbukitan. Nenek moyang yang membangun Borobudur telah memilih satu lokasi yang sangat tepat, di atas sebuah bukit kecil yang mampu memandang saujana yang terbentang dengan gunung-gunung dan bukit di cakrawala. Borobudur didirikan pada sekitar abad ke-8 pada masa dinasti Syailendra. Dinasti Syailendra merupakan dinasti yang berkuasa di Jawa dan memiliki pengaruh sangat besar di eranya. Para ahli berpendapat Syailendra berasal dari kata Syaila dan Indra yang berarti penguasa gunung, sehingga tidak mengherankan jika pusat peradabannya berada di lokasi yang dikelilingi gunung.

Borobudur dipergunakan sebagaimana fungsinya dalam masa yang tidak terlalu lama. Sekitar 1,5 abad setelah selesai pembangunan, Borobudur mulai ditinggalkan karena pergeseran peradaban ke Jawa bagian timur, ada yang berpendapat terjadinya bencana alam yang dikenal sebagai mahapralaya juga turut mempengaruhi. Selanjutnya Borobudur terabaikan dalam waktu yang sangat lama dan baru dibuka kembali pada masa penjajahan Belanda. Pembersihan besar-besaran dilakukan pada masa pemerintahan Gubernur Jenderal Raffles dan pemugaran pertama dilakukan pada tahun 1907-1911. Pemugaran berikutnya dilakukan pada tahun 1973-1983 oleh pemerintah Indonesia dibantu oleh UNESCO. Borobudur telah diakui sebagai warisan dunia (World Heritage) oleh UNESCO sejak tahun 1991 dengan nomor 592.

Saat ini Borobudur tidak hanya sebagai sebuah monumen bersejarah saja namun juga memainkan peran yang sangat penting bagi perekonomian. Borobudur saat ini masih menjadi tujuan utama wisata di Indonesia dengan jumlah pengunjung rata-rata pada beberapa tahun

terakhir tidak kurang dari 2 juta. Di samping nilai budaya, sejarah, dan ilmu pengetahuan Borobudur juga memiliki nilai ekonomi tinggi yang mampu menyumbangkan devisa negara dan pengembangan ekonomi masyarakat.

Keberadaan Borobudur di tengah gunung berapi merupakan ancaman terhadap kelestarian, yang telah terbukti dengan adanya erupsi merapi 2010 yang lalu. Gunung Merapi sebagai gunung api aktif selalu mengalami erupsi setiap periode waktu tertentu, dan setiap erupsi selalu menimbulkan dampak bagi kawasan sekitarnya termasuk Borobudur. Abu vulkanik yang dikeluarkan dari Gunung Merapi terbawa oleh angin dan sebagian besar mengarah ke barat. Berdasar pengamatan beberapa kali erupsi Gunung Merapi, baik besar maupun kecil hujan abu selalu terjadi di kawasan Borobudur. Erupsi besar yang telah terjadi pada 2010 menimbulkan dampak yang luar biasa. Material vulkanik yang dikeluarkan sangat besar dan tersebar ke berbagai arah, arah barat masih menjadi yang paling dominan. Candi Borobudur tertutup abu sangat tebal dan lingkungan sekitar candi terutama vegetasi mengalami kerusakan yang parah.

Sebagai sebuah situs yang memiliki nilai penting sangat tinggi dan juga berperan penting dalam perekonomian, penanganan Borobudur harus dilakukan dengan benar dan segera. Penanganan yang terlambat dapat menimbulkan dampak yang tidak diinginkan dan juga menghentikan kegiatan ekonomi. Oleh karena itu diperlukan langkah-langkah penanganan yang terencana dan didukung dengan penelitian agar efektif, efisien, dan aman. Penelitian laboratorium dan observasi lapangan seharusnya dilakukan untuk merencanakan penanganan, dan selama kegiatan penanganan semestinya juga dilakukan observasi dan analisis laboratorium.

B. Rumusan Masalah

Abu vulkanik yang menutupi Candi Borobudur dari erupsi tahun 2010 secara umum telah berhasil dibersihkan.

Sisa abu vulkanik yang telah masuh ke sela-sela batu dan saluran drainase juga telah ditangani. Namun masih diperlukan kajian untuk mengetahui dampak yang telah terjadi maupun yang kemungkinan dapat terjadi di masa yang akan datang. Permasalahan yang dapat dirumuskan dalam studi ini adalah sebagai berikut :

1. Apa dampak abu vulkanik secara langsung terhadap candi yang diobservasi secara visual.
2. Apa dampak abu vulkanik yang diobservasi pada permukaan batu yang dibiarkan tertutup abu vulkanik.
3. Apa dampak abu vulkanik terhadap perubahan mineralogi dan kimiawi batu andesit di laboratorium.
4. Bagaimana dampak aktivitas gunungapi terhadap beberapa cagar budaya berbahan batu andesit.

C. Tujuan

Tujuan yang hendak dicapai dalam pelaksanaan studi ini adalah sebagai berikut :

1. Mengetahui dampak abu vulkanik secara langsung terhadap candi yang diobservasi secara visual.
2. Mengetahui dampak abu vulkanik yang diobservasi pada permukaan batu yang dibiarkan tertutup abu vulkanik.
3. Mengetahui dampak abu vulkanik terhadap perubahan mineralogi dan kimiawi batu andesit di laboratorium.
4. Mengetahui dampak aktivitas gunungapi terhadap beberapa cagar budaya berbahan batu andesit.

D. Manfaat

Kajian ini diharapkan dapat memberikan manfaat untuk mengetahui dampak pelapukan yang terjadi terhadap batu-batu Candi Borobudur akibat tertutup abu vulkanik, baik dampak yang secara langsung dapat diamati maupun kemungkinan adanya dampak yang terjadi jangka panjang. Kajian ini diharapkan dapat mengungkap mekanisme pelapukan yang terjadi pada batu andesit oleh abu vulkanik, sehingga dapat digunakan untuk memahami pelapukan pada candi-candi lain yang terkena dampak aktivitas vulkanik. Diharapkan kajian ini bermanfaat tidak hanya untuk Candi Borobudur namun untuk cagar budaya lainnya, serta khasanah ilmu pengetahuan secara umum.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Posisi candi dan keadaan lansekap saujana budaya Candi Borobudur yang berada pada dataran yang dikelilingi gugusan pegunungan dan perbukitan disadari merupakan potensi kekayaan ekologi namun juga potensi bencana yang perlu diwaspadai. Candi Borobudur dalam skala makro dikelilingi oleh beberapa gunung dan satu perbukitan, yaitu Gunung Merbabu, Gunungapi Merapi, Gunung Andong, Gunung Tidar, Gunung Telomoyo,

Gunung Sindoro, Gunung Sumbing, dan perbukitan Menoreh yang memanjang di sebelah Selatan candi.

Gunungapi Merapi di Sebelah Timur Candi Borobudur adalah satu-satunya gunungapi aktif yang berada pada kawasan saujana budaya Candi Borobudur. Gunungapi Merapi beserta gunung-gunung yang lain sebenarnya merupakan bagian dari rangkaian gunung-gunung yang berjajar dari pulau Sumatra, Jawa sampai Bali dan Lombok. Khusus yang berada di pulau Jawa, lokasi gunung-gunung ini berada di tengah pulau yang berjajar dari Barat ke Timur. Gunungapi Merapi sendiri merupakan satu-satunya gunung aktif di antara jajaran gunung di pulau Jawa. Letaknya di tengah pulau, sebagian berada dalam wilayah administrative Propinsi DI Yogyakarta dan sebagian lagi masuk wilayah Propinsi Jawa Tengah. Secara fisik Gunungapi Merapi mempunyai batas-batas alam.

Bagian utara dilingkupi oleh pegunungan yang merupakan pertemuan antara Gunung Merbabu dan Gunungapi Merapi. Batas alam ini dibentuk dari hulu Sungai Pepe di wilayah Timur dan hulu Sungai Pabelan di wilayah barat. Secara administratif masuk dalam Kabupaten Boyolali, Propinsi Jawa Tengah.

Kaki gunung bagian Timur dan Selatan merupakan wilayah yang datar dan merupakan persawahan dengan kesuburan tanah yang tinggi. Bagian Timur ini membentang sampai bertemu dengan Sungai Bengawan Solo dan bagian Selatan bertemu dengan hulu Sungai Dengkeng. Sedangkan hulu Sungai Progo menjadikan batas alam gunung di bagian Barat.

Berdasarkan peta Geologi yang dikeluarkan oleh Direktorat Geologi Tata Lingkungan diperoleh informasi bahwa batuan utama penyusun Gunungapi Merapi terdiri dari dua macam yaitu endapan vulkanik Gunungapi Merapi Muda dan Endapan vulkanik Gunungapi Merapi purba (kwarter tua). Endapan vulkanik Gunungapi Merapi Muda, yang terdiri dari tufa, lahar, breksi, dan lava andesitis hingga basaltis. Endapan ini hampir tersebar merata di seluruh kawasan Gunungapi Merapi. Endapan vulkanik kwarter tua, yang keberadaannya secara setempat-setempat, khususnya di perbukitan. Endapan ini ditemui di bukit Turgo, Gono, Plawangan, Maron.

Aktivitas vulkanisme gunung tersebut hingga kini masih dapat kita saksikan. Material vulkanik Gunungapi Merapi seperti halnya dua sisi yang saling bertolak belakang, yaitu menguntungkan dan merugikan. Ribuan hingga jutaan meter kubik pasir, abu, dan batuan yang dikeluarkan merapi banyak memberikan keuntungan pada warga sekitarnya. Tetapi potensi kebencanaan yang muncul dari gunungapi ini sering tidak disadari dan diabaikan. Termasuk potensi kebencanaan yang sewaktu-

Tabel 1. Hasil analisis kimia sampel abu vulkanik tanggal 4 November 2010

NO	PARAMETER	SAMPEL 4-11-2010	SATUAN
Sampel abu vulkanik			
1	Kalsium (Ca)	3,2732	%
2	Magnesium (Mg)	4,824	%
3	Besi (Fe)	7,42805	%
4	Aluminium (Al)	12,8425	%
5	Sulfat (SO ₄)	5,309	%
6	Karbonat (CO ₃)	4,7742	%
7	Silika (SiO ₂)	56,55	%
8	Klorida (Cl)	0,175	%
Sampel larutan abu vulkanik			
9	pH	5	
10	Total Ion	0,22	ppm
11	Conductivity	424,4	μs
12	Padatan terlarut (TDS)	3,138	ppm
13	Salinitas	379	ppm
14	Resistivity	159,1	Ω
15	Turbidity	644	FTU

waktu dapat menimpa Candi Borobudur. Memang masih sulit untuk diperkirakan potensi bencana apa, yang akan menimpa Candi Borobudur karena aktivitas vulkanik Gunungapi Merapi (Balai Konservasi Borobudur, 2010).

Keberadaan Borobudur di tengah gunung berapi merupakan ancaman yang telah terbukti dengan adanya erupsi merapi 2010 yang lalu. Gunung Merapi sebagai gunungapi aktif selalu mengalami erupsi setiap periode waktu tertentu, dan setiap erupsi selalu menimbulkan dampak bagi kawasan sekitarnya termasuk Borobudur. Abu vulkanik yang dikeluarkan dari Gunung Merapi terbawa oleh angin dan sebagian besar mengarah ke barat. Berdasar pengamatan beberapa kali erupsi Gunung Merapi, baik besar maupun kecil hujan abu selalu terjadi di kawasan Borobudur. Erupsi besar yang telah terjadi pada 2010 menimbulkan dampak yang luar biasa. Material vulkanik yang dikeluarkan sangat besar dan tersebar ke berbagai arah, arah barat masih menjadi yang paling dominan. Candi Borobudur tertutup abu sangat tebal dan lingkungan sekitar candi terutama vegetasi mengalami kerusakan yang parah.

Sampel abu vulkanik diambil tanggal 4 November 2010 pada permukaan batu stupa induk. Analisa kimia abu vulkanik menghasilkan data sebagai berikut (Balai Konservasi Peninggalan Borobudur, 2010)(Tabel 1).

Analisis fisik abu vulkanik menghasilkan data sebagai berikut untuk grain size abu vulkanik :

- *Very Coarse sand* – kasar > 1 mm = 5 %
- *Medium sand* – sedang 0,25 – 1 mm = 10 %
- *Fine sand* – halus 0,125 – 0,25 = 20 %
- *Very fine sand* – sangat halus < 0,125 = 65 %

Material vulkanik dari Gunungapi Merapi yang menutup permukaan Candi Borobudur memiliki ukuran

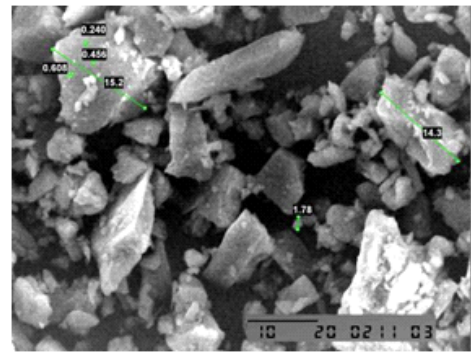


Foto 1 Material halus dari abu vulkanik menggunakan SEM dengan perbesaran 2000

- Ukuran butiran ± 0,240 – 15,2 micrometer
- Bentuk butiran tak beraturan
- Keseragaman butiran tidak sempurna
- Persebaran butiran tidak merata

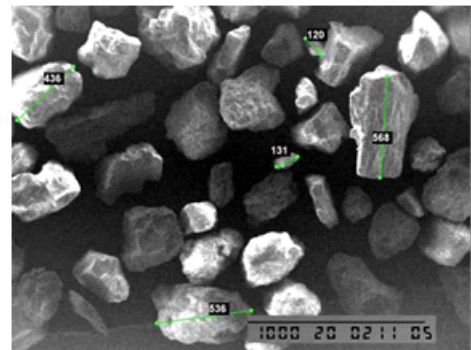


Foto 2 Material kasar dari abu vulkanik menggunakan SEM dengan perbesaran 50 x

- Ukuran butiran ± 120 – 568 micrometer
- Bentuk butiran bulat tak beraturan
- Keseragaman butiran tidak sempurna
- Persebaran butiran tidak merata

butir dan bentuk yang tidak seragam. Analisis dengan *Scanning Electron Microscope* (SEM) terhadap material halus (abu) dan kasar (pasir) menghasilkan data pada foto 1 dan 2.

III. METODOLOGI PENELITIAN

A. Bahan

Bahan yang diperlukan meliputi bahan percobaan laboratorium (meliputi batu andesit baru, abu vulkanik, asam sulfat, dan akuadest), bahan observasi berupa alat tulis dan bahan cetak serta dokumentasi. Selain itu juga diperlukan bahan analisis laboratorium, yaitu bahan kimia untuk analisis destruktif (Canada balsam, Titriplex III, ZnSO₄, Metal Indikator, Kertas saring, kertas pH, akuadest, dan beberapa bahan kimia pendukung lain), dan sewa alat untuk analisis mineral dan XRD.

B. Alat

Alat yang diperlukan adalah alat-alat survey lapangan dan alat-alat percobaan, serta alat laboratorium untuk analisis.

C. Prosedur Kerja

1. Pengamatan dampak abu vulkanik terhadap permukaan batu candi

Pengamatan dilakukan secara langsung pada permukaan batu-batu candi, baik pada bagian horozontal maupun bagian vertikal. Parameter pengamatan meliputi ada atau tidaknya perubahan warna, perubahan porositas secara visual, dan perubahan kekerasan atau sifat fisik lainnya. Pengamatan ini dibandingkan dengan sebelum terjadinya erupsi merapi. Pengamatan secara langsung ini bersifat subjektif sehingga dapat mengalami bias, oleh karena itu pengamatan dilakukan oleh beberapa orang yang sebelumnya terbiasa melakukan observasi kerusakan dan pelapukan batu Candi Borobudur.

2. Pengamatan batu yang dibiarkan tertutup abu vulkanik

Beberapa lokasi di Candi Borobudur dibiarkan tetap tertutup abu vulkanik (tidak dibersihkan), dan dilindungi agar tidak hilang oleh air hujan. Beberapa lokasi ini akan diobservasi secara berkala untuk mengetahui dampak yang terjadi. Observasi dilakukan dengan membuka/mengupas secara bertahap area seluas kurang lebih 100 cm² dan membandingkan dengan batu yang segera dibersihkan setelah erupsi. Observasi dilakukan secara periodik untuk mengetahui perubahannya dari waktu ke waktu.

3. Percobaan laboratorium

Percobaan laboratorium dilakukan dengan membuat simulasi batu andesit yang terkena abu vulkanik dalam waktu yang lama, dan batu andesit yang direndam dalam larutan asam sulfat (H₂SO₄) encer sebagai simulasi ekstrim. Percobaan dilakukan dengan membuat potongan-potongan tipis batu andesit. Potongan-potongan tersebut selanjutnya direndam dalam larutan abu vulkanik dan larutan asam sulfat dengan variasi konsentrai (pH \approx 7 hingga pH \approx 0), sebagai kontrol digunakan akuades. Perendaman dilakukan selama 50 hari dengan diamati secara rutin. Perubahan-perubahan yang terjadi diobservasi dan dianalisis.

4. Analisis laboratorium

Analisis laboratorium yang dilakukan bertujuan untuk mengetahui perubahan secara mikro, mineralogi, dan kimiawi terhadap batu andesit yang direndam abu vulkanik dan larutan asam sulfat sebagai simulasi. Analisis yang dilakukan meliputi analisis mikroskopis

dengan SEM dan mikroskop stereo, analisis mineralogi dengan XRD, analisis FTIR, dan analisis kimia destruktif.

5. Studi banding

Studi banding yang direncanakan adalah ke situs candi yang terbuat dari batu andesit dan terkena dampak aktivitas gunung berapi. Situs yang akan dikunjungi adalah candi Dieng dan Gedongsongo sebagai candi yang selalu terpapar gas belerang sehingga mengalami pelapukan. Situs lain yang akan dikunjungi adalah situs Candi Liyangan di Temanggung sebagai candi yang terkena dampak erupsi langsung gunung berapi. Candi Liyangan ini terkena dampak abu vulkanik secara langsung bahkan abu yang mengenai merupakan material panas yang dibuktikan dengan ditemukannya struktur bangunan kayu yang menjadi arang sehingga dapat menjadi contoh analisis dampak abu vulkanik terhadap andesit.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. DATA

1. Pengamatan dampak abu vulkanik terhadap permukaan batu candi

Pengamatan didasarkan pada survey wawancara kepada beberapa orang mengenai pengamatan visual terhadap terjadinya perubahan permukaan batu-batu candi Borobudur. Wawancara terutama difokuskan kepada tenaga konservasi yang sehari-hari menangani batu-batu candi sehingga lebih mengingat perubahan-perubahan yang mungkin terjadi. Wawancara juga dilakukan kepada beberapa tenaga senior eks pemugaran yang juga memiliki memori kuat mengenai kondisi permukaan batu candi.

Hasil survey menyatakan bahwa perubahan yang terjadi setelah selesainya pembersihan adalah sebagai berikut:

- Pertama terlihat permukaan batu menjadi lebih putih dari sebelumnya. Hal ini dimungkinkan karena masih ada sebagian abu yang masih berada di permukaan maupun pori-pori terluar batu.
- Setelah beberapa kali terkena hujan lebat, terlihat permukaan batu menjadi terlihat lebih bersih seolah-olah batu baru. Beberapa orang menyatakan terjadi perubahan permukaan batu menjadi agak lebih merah. Diperkirakan hal ini terjadi karena hilangnya lapisan tipis di permukaan yang biasa disebut patina.
- Hal ini tidak berlangsung lama, karena beberapa minggu kemudian kenampakan batu kembali ke keadaan sebelum terjadinya erupsi. Sebagian besar responden saat ini menyatakan bahwa permukaan batu-batu candi secara visual terlihat sama dengan



1



2

Gambar lokasi permukaan batu yang ditutup dan kondisi permukaan batu yang terlapisi abu setelah tutup dibuka



3



4



5

Pembukaan sebagian permukaan untuk observasi dampak, dan pengukuran pH permukaan. Observasi pertama (4) dan observasi ke dua (5)



6



7

Hasil observasi pertama dan kedua dapat dilihat pada kedua foto ini. Terlihat bahwa tidak terjadi dampak berupa perubahan warna maupun kekerasan permukaan.

saat belum terkena erupsi. Adanya perbedaan masih terjadi pada lokasi-lokasi yang terdapat aliran abu keluar dari dalam karena terbawa aliran air.

2. Pengamatan batu yang dibiarkan tertutup abu vulkanik

Salah satu cara untuk mengetahui dampak abu vulkanik terhadap permukaan batu adalah dengan membiarkan permukaan batu tertutup abu. Setelah beberapa bulan diamati perubahan yang terjadi. Hasil pengamatan terlihat bahwa tidak terindikasi adanya perubahan pada permukaan batu, baik kenampakan visual maupun tingkat kekerasan, gambar 3,4,5,6 dan 7 merupakan hasil pengamatan kondisi permukaan yang menjadi lokasi percobaan.

3. Percobaan laboratorium

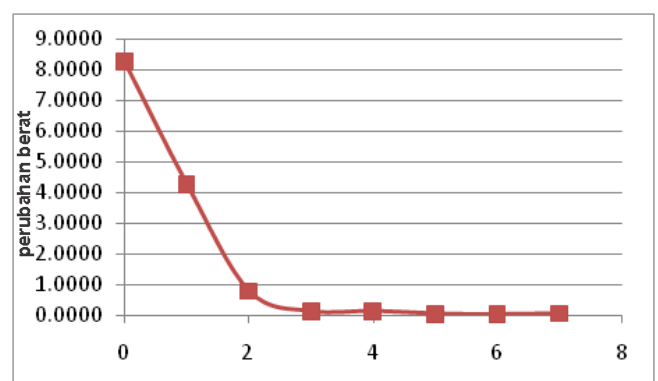
Percobaan simulasi di laboratorium dilaksanakan dengan merendam sampel batu dalam abu basah. Sebagai perbandingan digunakan akuades, dan untuk mengetahui dampak perubahan ekstrim yang mungkin terjadi batu direndam dalam larutan asam sulfat berbagai kadar (pH) (Tabel 2 dan Grafik 1).

Untuk memperkuat dan menjelaskan unsur apa saja yang terlarut sebagaimana dijelaskan dari data percobaan, di lakukan analisis terhadap larutan perendam. Berikut ini ditampilkan data kandungan beberapa unsur yang terdapat dalam larutan perendam. Data perendaman dapat dilihat pada tabel 3 dan grafik 2,3,4. Selain larutan perendamnya, sampel batu yang direndam juga dianalisis, dengan hasil pada tabel 4 dan grafik 5, 6.

Tabel 2. Perubahan berat batu andhesit yang direndam dalam larutan asam sulfat pada berbagai variasi pH dan dalam abu vulkanik

NO	LARUTAN PERENDAM	KODE SAMPEL	BERAT ANDESIT YANG DIRENDAM(g)		PERUBAHAN BERAT	%PERUBAHAN BERAT	HASIL	RATA-RATA
			SEBELUM	SETELAH				
1	AKUADEST	AQ.1	2,1820	2,1819	0,0001	0,0046		
2		AQ.2	2,3965	2,3957	0,0008	0,0334		0,0216
3		AQ.3	1,8654	1,8649	0,0005	0,0268		
4	ASAM pH=7	SULFAT	7,1	1,9634	1,9627	0,0007	0,0357	
5			7,2	2,0032	2,0022	0,0010	0,0499	0,0598
6			7,3	1,8111	1,8094	0,0017	0,0939	
7	ASAM pH=6	SULFAT	6,1	2,2757	2,2750	0,0007	0,0308	
8			6,2	2,2109	2,2101	0,0008	0,0362	0,0300
9			6,3	2,1608	2,1603	0,0005	0,0231	
10	ASAM pH=5	SULFAT	5,1	1,8260	1,8249	0,0011	0,0602	
11			5,2	1,8722	1,8715	0,0007	0,0374	0,0491
12			5,3	2,2176	2,2165	0,0011	0,0496	
13	ASAM pH=4	SULFAT	4,1	2,2907	2,2843	0,0064	0,2794	
14			4,2	1,8966	1,8953	0,0013	0,0685	0,1382
15			4,3	1,5007	1,4997	0,0010	0,0666	
16	ASAM pH=3	SULFAT	3,1	1,6527	1,6507	0,0020	0,1210	
17			3,2	1,8240	1,8222	0,0018	0,0987	0,1279
18			3,3	1,9512	1,9480	0,0032	0,1640	
19	ASAM pH=2	SULFAT	2,1	2,0232	2,0037	0,0195	0,9638	
20			2,2	2,0282	2,0157	0,0125	0,6163	0,7860
21			2,3	1,7997	1,7857	0,0140	0,7779	
22	ASAM pH=1	SULFAT	1,1	2,0144	1,9672	0,0472	2,3431	
23			1,2	1,8679	1,7638	0,1041	5,5731	4,2856
24			1,3	2,1516	2,0453	0,1063	4,9405	
25	ASAM SULFAT 1 N		0,1	2,3279	2,1255	0,2024	8,6945	
26			0,2	1,9575	1,7924	0,1651	8,4342	8,2940
27			0,3	2,1372	1,9715	0,1657	7,7531	
28	ABU VULKANIK	A.1	2,0285	2,0915	0,0630	3,1057		
29	TGL 27 SEPT	A.2	2,0171	2,0388	0,0217	1,0758	2,4575	
30		A.3	2,1466	2,2151	0,0685	3,1911		
31	ABU VULKANIK	B.1	2,1828	2,2160	0,0332	1,5201		
32	TGL 4 OKT	B.2	1,7600	1,7760	0,0160	0,9091	1,1609	
33		B.3	2,0713	2,0931	0,0218	1,0525		

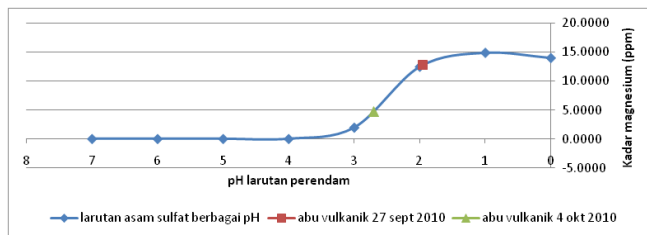
Grafik 1. Perubahan berat batu andhesit pada variasi pH larutan perendam asam sulfat



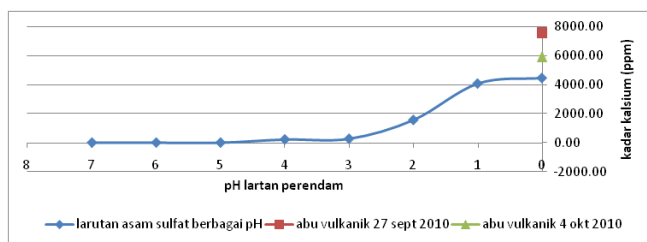
Tabel 3. Data kadar kalsium, magnesium dan besi terlarut dalam variasi pH larutan percobaan dan dalam abu vulkanik

NO	KODE SAMPEL	PARAMETER		
		Ca(ppm)	Mg(ppm)	Fe(ppm)
1	0	4475,60	14,0233	23,8300
2	1	4091,50	14,9267	22,0267
3	2	1569,80	12,5000	11,3987
4	3	267,20	1,9583	0,0701
5	4	217,10	<0,1	<0,01
6	5	< 200	<0,1	<0,01
7	6	<200	<0,1	<0,01
8	7	<200	<0,1	<0,01
9	AQ.1	<200	<0,1	<0,01
10	A	7590,15	12,8100	1,3344
11	B	5953,55	4,7710	0,3734

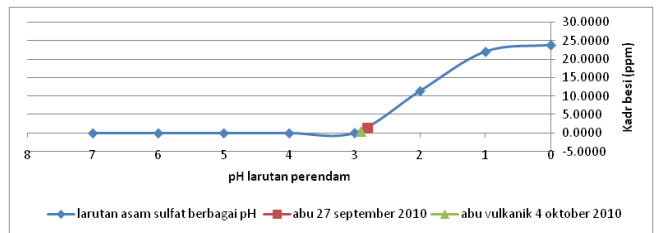
Grafik 2. Grafik kadar magnesium dalam larutan perendam asam sulfat dengan berbagai konsentrasi



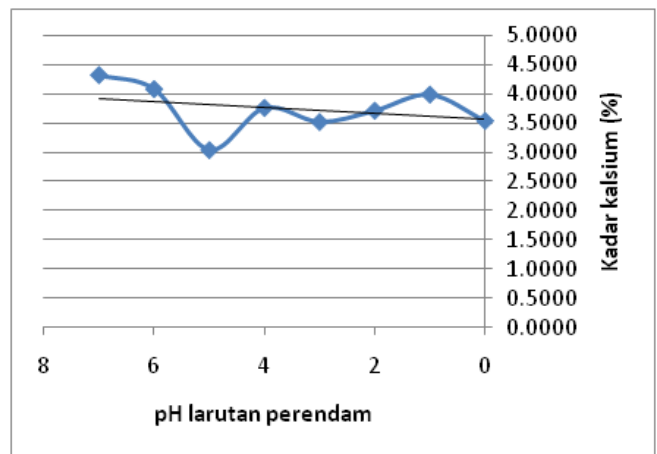
Grafik 3. Grafik kadar kalsium dalam larutan perendam dengan asam sulfat berbagai konsentrasi



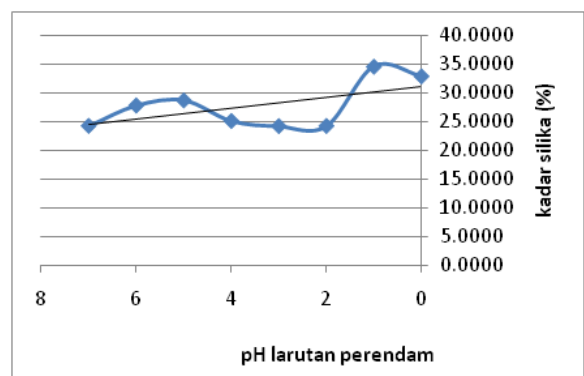
Grafik 4. Grafik kadar besi dalam larutan perendam asam sulfat dengan berbagai konsentrasi



Grafik 5. Perubahan kandungan kalsium dengan pengaruh variasi pH larutan perendam.



Grafik 6. Perubahan silika dengan pengaruh variasi pH larutan perendam.



Tabel 4. Analisis sampel batu yang telah direndam dengan berbagai larutan

NO	KODE SAMPEL	PARAMETER					
		Kalsium(Ca)	Magnesium(Mg)	Besi(Fe)	Sulfat(SO ₄)	Silikat(SiO ₂)	Karbonat(CO ₃)
1	Akuadest	4,7882	6,3530	7,5062	7,7463	27,6000	4,5273
2	7	4,3286	5,6010	6,5143	8,2996	24,3200	3,0545
3	6	4,0882	6,1164	6,7221	6,6627	27,8800	2,1000
4	5	3,0461	4,6805	6,9611	5,8404	28,7800	4,3364
5	4	3,7675	3,9609	5,4599	7,5849	25,1800	7,9569
6	3	3,5270	4,8134	6,6350	7,1853	24,2800	3,2541
7	2	3,7194	6,2979	7,7743	3,1200	24,3000	3,9818
8	1	3,9955	6,2788	7,8957	0,5223	34,6762	3,1364
9	0	3,5454	4,5697	4,9404	0,8497	32,9878	4,1455
10	A	3,0781	4,6675	6,2195	0,7377	31,9400	5,1000
11	B	3,6847	4,5397	6,7391	0,3312	37,4273	4,2273
12	baru	3,5912	4,8231	5,7905	0,3689	36,3400	3,9273

4. Analisis laboratorium

a. SEM dengan perbesaran 1000 X

Gambar kenampakan batu andesit menggunakan SEM dengan perbesaran 1000 X pada sampel-sampel batu yang telah direndam dalam larutan perendaman pada berbagai variasi pH, dan dalam abu vulkanik

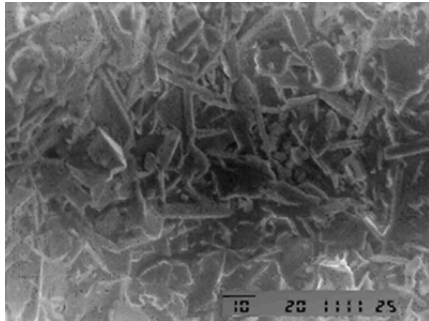


Foto 8. Batu baru tanpa treatment

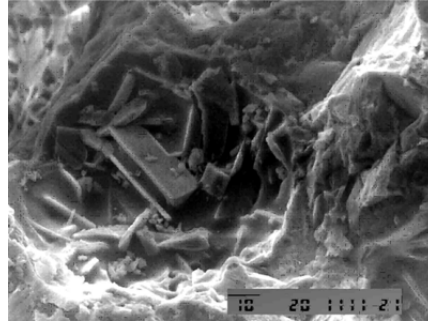


Foto 9. Batu direndam akuades

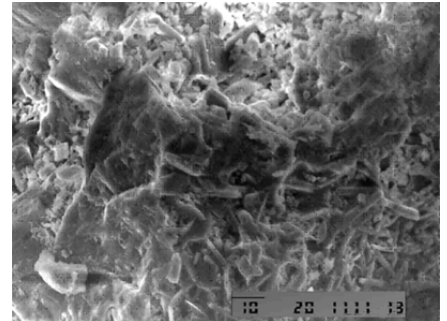


Foto 10. Batu direndam asam sulfat encer pH ≈ 7

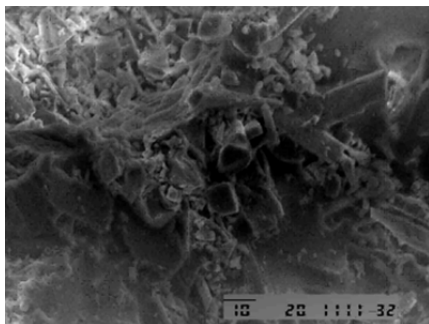


Foto 11. Batu direndam asam sulfat encer pH = 6

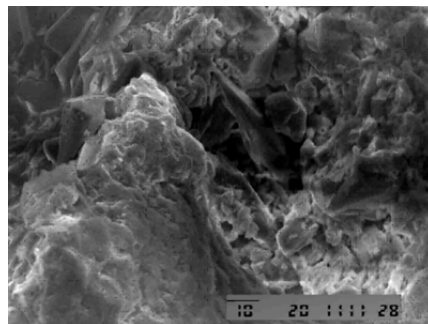


Foto 12. Batu direndam asam sulfat encer pH = 5

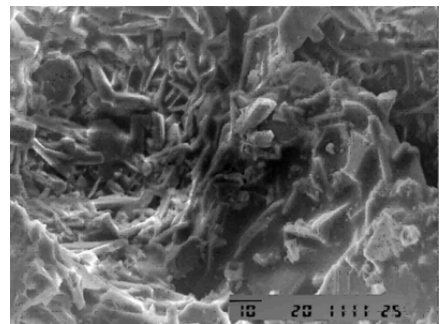


Foto 13. Batu direndam asam sulfat pH = 4

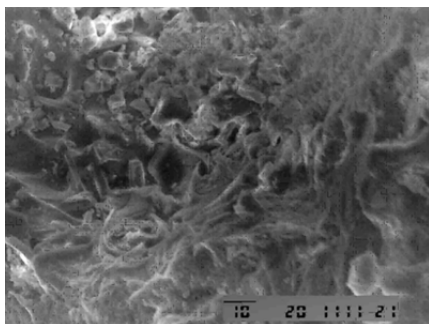


Foto 14. Batu direndam asam sulfat pH = 3

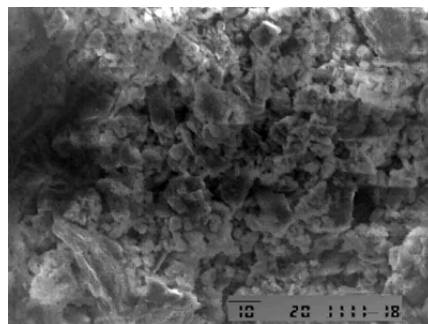


Foto 15. Batu direndam asam sulfat pH = 2

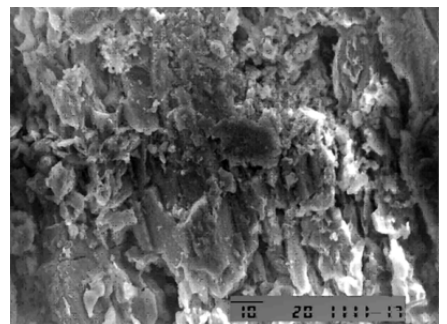


Foto 16. Batu direndam asam sulfat pH = 1

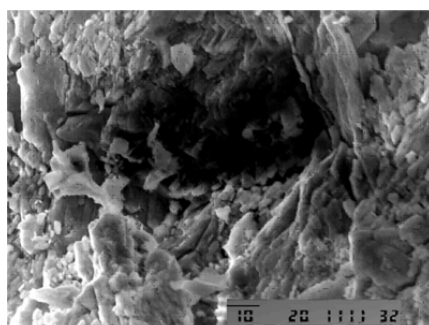


Foto 17. Batu direndam asam sulfat pH ≈ 0

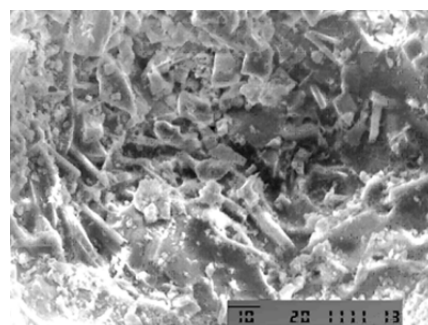


Foto 18. Batu direndam abu vulkanik 27 okt 2010

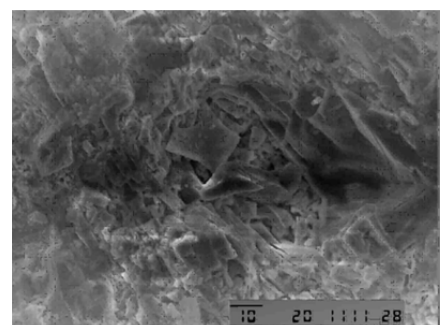


Foto 19. Batu direndam abu vulkanik 4 okt 2010

b. Mikroskop Polarisasi

Hasil analisis dengan mikroskop polarisasi terhadap sampel-sampel batu andesit yang telah direndam dalam larutan perendam dengan variasi pH dan dalam abu vulkanik

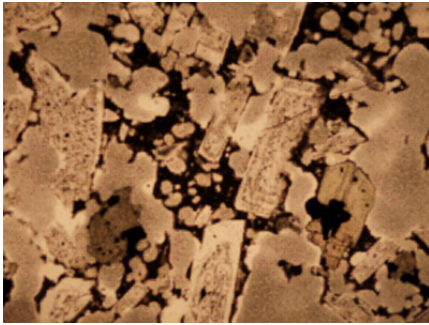


Foto 20. Nikol sejajar

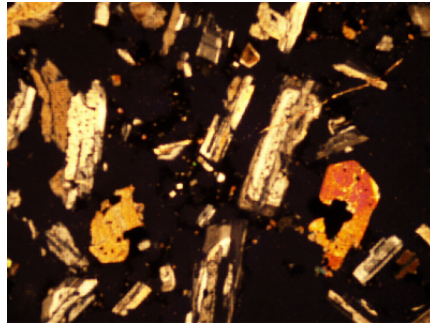


Foto 21. Nikol bersilang

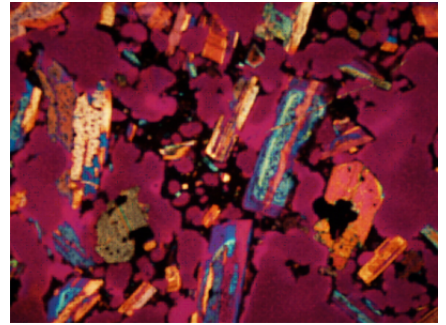


Foto 22. Nikol bersilang + keping

Batu direndam dalam abu vulkanik 4 okt 2010

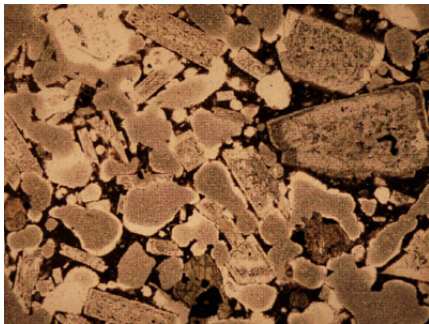


Foto 23. Nikol sejajar

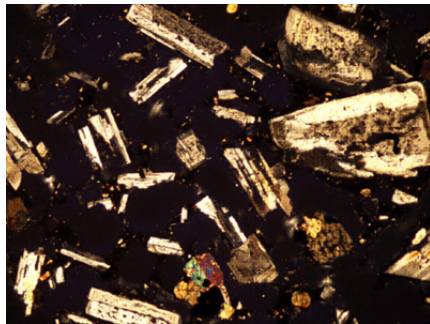


Foto 24. Nikol bersilang

Batu baru tanpa perlakuan

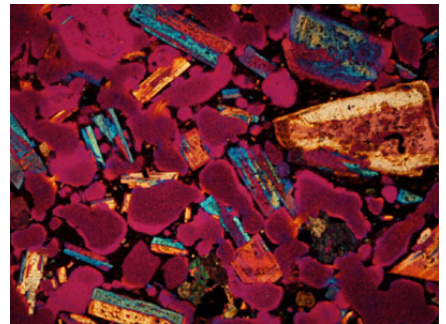


Foto 25. Nikol bersilang + keping

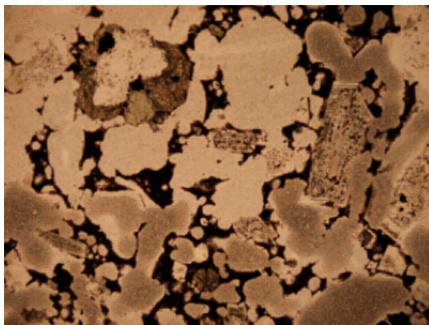


Foto 26. Nikol sejajar

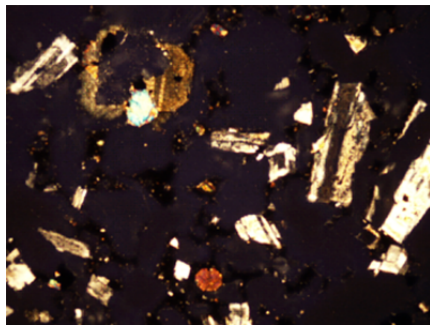


Foto 27. Nikol bersilang

Batu direndam dalam asam sulfat pH =4

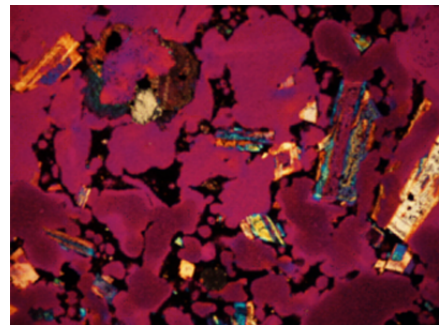


Foto 28. Nikol bersilang + keping

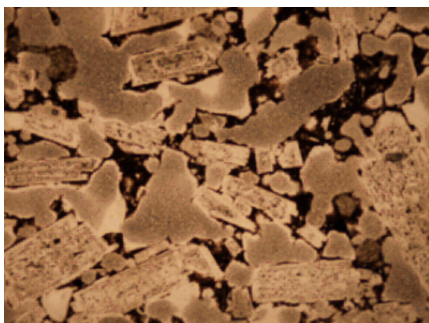


Foto 29. Nikol sejajar

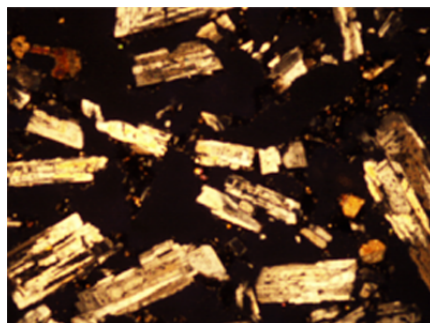


Foto 30. Nikol bersilang

Batu direndam dalam abu vulkanik 27 sept 2010

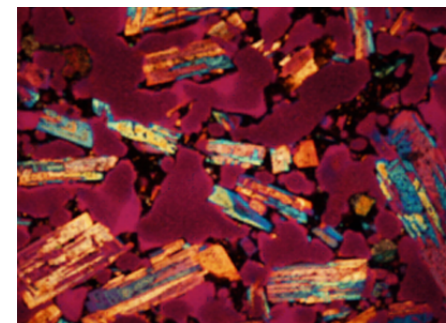


Foto 31. Nikol bersilang + keping

Berdasar pengamatan mikroskop polarisasi di atas, batu baru yang tidak mendapat perlakuan memiliki komposisi mineral plagioklas kurang lebih 55%, piroksen kurang lebih 10%, mineral opak kurang lebih 5%, dan masa dasar 30%. Pada variasi pH larutan perendam asam sulfat terlihat bahwa kenampakan mulai menunjukkan perbedaan (yaitu menjadi kusam) mulai pH 4,3,2,1,dan 0. Pada sampel batu yang direndam dalam abu tidak mengalami perubahan.

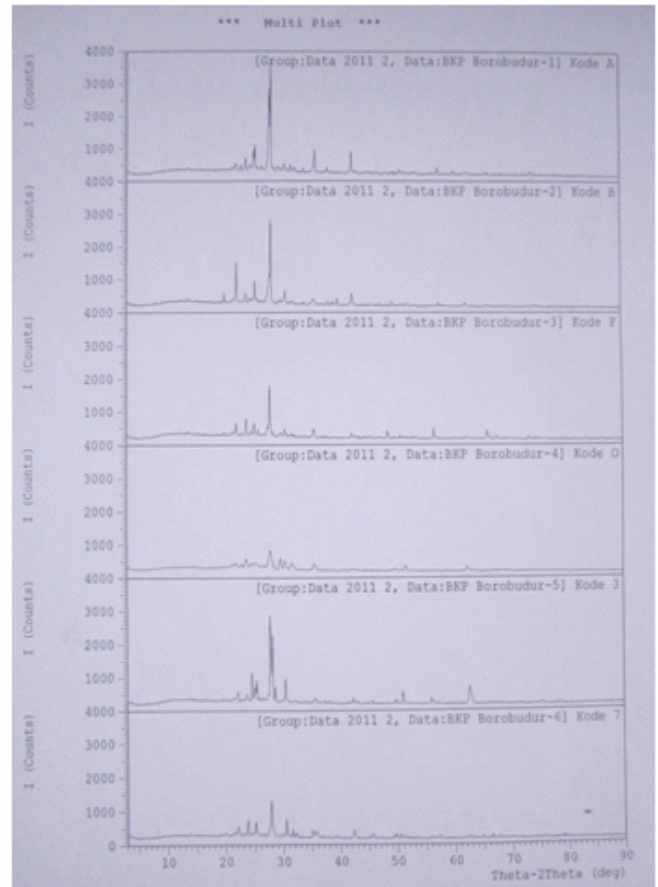
c. XRD

Hasil analisis XRD secara lengkap akan disajikan dalam lampiran. Hasil spektra sampel ditampilkan dalam gambar kompilasi (grafik 7).

Berdasar data sudut difraksi dan intensitas pada sampel batu baru dan batu yang direndam dalam abu vulkanik, dapat diinterpretasi jenis mineral penyusunnya. Setelah dibandingkan dengan data standar diperoleh tabel interpretasi (tabel 5 dan 6).

Perbandingan spektra di atas menunjukkan mineral yang mungkin sebagai komponen utama penyusun batu adalah sodium aluminium silikat dan atau sodium kalsium aluminium silikat. Hal ini juga sejalan dengan hasil analisis komposisi dengan analisis kimia. Analisis XRD ini juga menunjukkan perubahan yang terjadi pada variasi pH, dimana pada pH 3 dan 0 menunjukkan bentuk spektra

Grafik 7. Hasil spektra XRD sampel batu andhesit yang telah di rendam dalam larutan perendaman dan abu vulkanik



Tabel 5. Interpretasi jenis mineral dengan data spektra XRD

sodium aluminium silikat		batu baru		Batu direndam abu 27 sept		Batu direndam abu 4 okt	
d	intensitas	d	intensitas	d	intensitas	d	intensitas
3,176	100	3,185	100	3,158	100	3,163	100
				3,186	70	3,186	30
3,752	30	3,725	33	3,734	10	3,735	10
4,040	16	4,011	25	4,020	5	4,002	48
2,927	12	2,922	14	2,930	6	2,911	15
2,518	8	2,516	21	2,495	21	2,510	6
2,120	6	2,132	12	2,130	23	2,126	15

Tabel 6. Interpretasi jenis mineral dengan data spektra XRD

sodium kalsium aluminium silikat		batu baru		Batu direndam dalam abu 27 sept		Batu direndam dalam abu 4 okt	
d	intensitas	d	intensitas	d	intensitas	d	intensitas
3,19	100	3,185	100	3,158	100	3,163	100
				3,186	70	3,186	30
3,74	11	3,725	33	3,734	10	3,735	10
3,48	36	3,498	5	3,494	22	3,500	24
2,94	31	2,922	14	2,930	6	2,911	15
2,53	11	2,516	21	2,526	15	2,542	3
1,80	12	1,794	9	1,791	4	1,840	7

yang lebih melebar. Bentuk puncak melebar menunjukkan semakin buruknya kekristalan dari sampel. Meskipun analisis XRD ini belum bisa menjelaskan perubahan mineral menjadi mineral baru jenis apa, namun adanya perubahan telah bisa dikonfirmasi.

d. FTIR

Hasil analisis FTIR dapat dilihat pada foto spektra 32-35, memperlihatkan bahwa secara umum bentuk spektra relatif mirip. Hal ini menunjukkan komponen masing-masing sampel secara ikatan antar molekul relatif sama. Perbedaan yang terdeteksi pada sampel perendaman asam sulfat pH 0 dan pH 3 dibanding batu baru, dapat dilihat pada spektra di sisi kanan (daerah infra merah dekat/near infra red). Meskipun belum bisa diketahui terbentuknya senyawa baru apa, namun perbedaan ini telah memberikan konfirmasi adanya perubahan kimia.

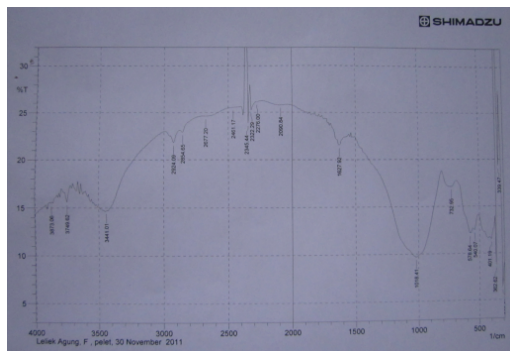


Foto 32. Spektra IR batu asli tanpa perlakuan

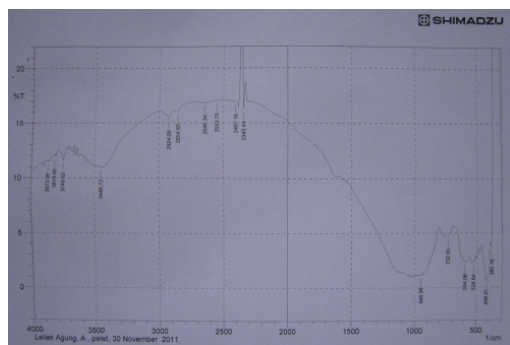


Foto 34. Spektra IR batu direndam abu 27 sept

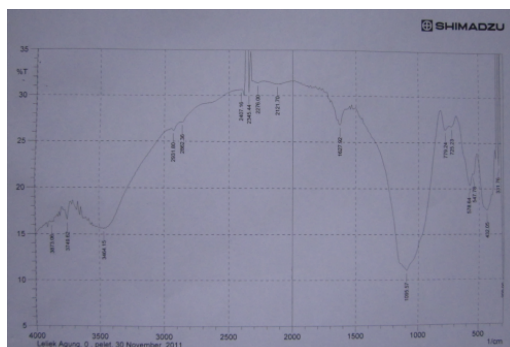


Foto 33. Spektra IR batu direndam asam sulfat

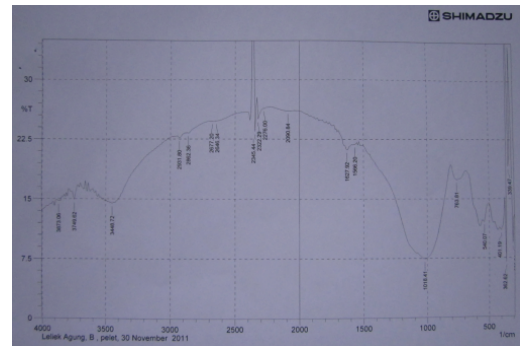


Foto 35. Spektra IR batu direndam abu 4 okt 2010

5. Studi banding

Hasil studi banding untuk mengetahui dampak material vulkanik terhadap batu andesit pada beberapa candi dapat dilihat pada foto 36-50. Dari hasil studi banding dapat diinterpretasikan dampak yang terjadi terhadap candi-candi berdasar observasi langsung. Beberapa dampak yang terlihat dan kemungkinan diakibatkan oleh pengaruh material vulkanik adalah sebagai berikut :



Foto 36. (Candi Liyangan) menunjukkan kondisi batu penyusun candi yang masih dalam kondisi baik, meskipun pernah terkena material panas dari gunung api



Foto 37. Di sekitar Candi Liyangan ditemukannya arang yang diduga kayu yang terbakar material panas dari gunung api



Foto 38 (Candi Losari) Menunjukkan batu-batu candi yang cukup baik



Foto 39. (Candi Losari) Terlihat adanya lapisan merah pada permukaan batu



Foto 40. Candi Lumbung Sengi yang sedang dalam pembongkaran untuk relokasi.



Foto 41. Pengujian kekerasan batu pada Candi Lumbung Sengi menunjukkan kondisi batu yang masih cukup baik (belum mengalami pelapukan)



Foto 42. Candi Palgading baru dibuka setelah terpendam lama



Foto 43. Uji kekerasan pada Candi Palgading memperlihatkan kondisi batu yang masih cukup baik



Foto 44. Candi Kimpulan telah selesai dipugar berada di depan gedung perpustakaan Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta.



Foto 45 Kondisi batu Candi Kimpulan masih cukup baik, ditemukan lapisan merah yang diduga merupakan lapisan asli dari permukaan batu candi bagian atas



Foto 46. Candi Morangan yang memperlihatkan timbunan material dari gunungapi



Foto 47. Kondisi batu-batu Candi Morangan yang masih cukup baik



Foto 48. Candi Sambisari tersusun dari batu-batu yang masih cukup baik



Foto 49. Batu Tuff pada bagian pagar Candi Sambisari memperlihatkan lapisan merah dari bekas timbunan tanah



Foto 50. Candi Kedulan pernah terkena timbunan material dari gunungapi, terlihat kondisi batu-batu candi yang masih cukup baik

- Timbulnya endapan merah pada permukaan batu, terutama di bagian bawah.
- Berkurangnya kekerasan permukaan yang diukur dengan skala Mohs.
- Kerusakan fisik batu (retak, pecah)

B. PEMBAHASAN

Berdasarkan data di atas secara umum batu andesit tidak mengalami perubahan yang signifikan oleh pengaruh dampak abu vulkanik. Pengamatan langsung terhadap permukaan Candi Borobudur menunjukkan bahwa kondisi permukaan batu-batu candi dapat dikatakan tidak

berubah dibanding kondisi sebelum terkena erupsi Gunung Merapi. Observasi terhadap permukaan batu yang dibiarkan tertutup abu vulkanik hingga satu tahun menunjukkan tidak terjadi perubahan. Observasi ini akan terus dilanjutkan hingga jangka waktu yang belum ditentukan, karena dampak abu vulkanik bisa saja terjadi setelah jangka panjang dan tidak terprediksi sebelumnya.

Percobaan menggunakan larutan asam sulfat dengan variasi pH memberikan informasi yang sangat penting. Percobaan ini dapat memberikan gambaran bagaimana terjadinya pelapukan material andesit dalam kondisi asam. Sebagaimana telah diketahui bersama, abu

vulkanik mengandung unsur belerang yang tinggi. Keberadaan belerang ini dapat membentuk asam sulfat yang menyebabkan abu vulkanik bersifat asam dan dapat membahayakan kelestarian batu candi. Percobaan menggunakan larutan asam sulfat merupakan pendekatan yang cukup baik untuk memahami dampak abu terhadap batu andesit.

Hasil percobaan menunjukkan bahwa perubahan terjadi seiring dengan turunnya pH (naiknya keasaman). Dalam kondisi netral atau asam sulfat encer, perubahan tidak terdeteksi. Sebaliknya dalam kondisi pH rendah, perubahan sangat nyata terjadi. Keseluruhan analisis laboratorium dan instrumental mengindikasikan hal yang sama. Analisis kimia terhadap larutan perendam sangat jelas menggambarkan larutnya sebagian komponen batu andesit ke dalam larutan perendam. Demikian juga analisis terhadap batu yang telah direndam memberikan kesimpulan yang sejalan.

Analisis dengan SEM, XRD, mikroskop polarisasi, dan FTIR memberikan data yang mengarah pada kesimpulan yang sama yaitu adanya perubahan komponen penyusun batu andesit seiring dengan turunnya pH. Semakin rendah pH maka semakin banyak perubahan yang terjadi. Hal yang menarik adalah semua metode analisis, baik kimia maupun instrumental mampu memberikan informasi yang sama tentang pada pH berapa perubahan mulai terjadi. Semua data menunjukkan bahwa perubahan secara nyata terjadi pada pH 3 dan mulai mengalami perubahan pada pH 4. Kesimpulan ini menjadi dasar yang penting dalam mengkaji dampak aktivitas vulkanik terhadap batu andesit.

Sejauh ini observasi terhadap batu candi Borobudur, baik observasi langsung maupun observasi terhadap batu yang dibiarkan tertutup abu menunjukkan belum ada indikasi terjadinya pelapukan. Hasil studi lapangan dengan mengobservasi candi-candi yang pernah mengalami dampak erupsi gunung berapi juga menunjukkan tidak terjadi pelapukan yang serius. Beberapa dampak yang terjadi bersifat ringan dan tidak menyebabkan dampak material menjadi lapuk.

Jika fakta tersebut dikorelasikan dengan hasil simulasi menggunakan larutan asam sulfat, maka hal tersebut dapat dijelaskan. Simulasi menunjukkan bahwa dampak perubahan kimiawi mulai terjadi pada pH 4 dan semakin cepat pada pH lebih rendah. Kondisi di lapangan menunjukkan bahwa pH yang teramati umumnya di atas 4, yaitu sekitar 4,5-6. Selain itu keberadaan asam tersebut juga tidak terlalu lama. Dalam kondisi alami tanpa campur tangan manusia, hujan dan air tanah akan mampu melarutkan asam-asam yang ada. Secara alamiah kondisi batu tertutup abu dengan tingkat keasaman di bawah 4

dalam kondisi lama sulit tercapai. Kondisi pH di bawah 4 tidak berlangsung lama karena asam tersebut dapat larut oleh air, sehingga turunnya hujan dapat segera menetralkan.

Hal ini berbeda dengan situasi di Candi Dieng yang terkena dampak langsung dari gas vulkanik. Karena yang mengenai candi adalah gas, maka asam terbentuk pada saat gas bereaksi dengan air atau uap air. Dalam kondisi tidak hujan, asam terbentuk bersama uap air atau embun. Kondisi ini menyebabkan asam mudah terbentuk dengan konsentrasi yang tinggi. Karena keluarnya gas vulkanik terjadi secara terus menerus maka pelapukan di Candi Dieng terutama yang dekat dengan kawah menjadi sangat serius.

Faktor lainnya yang mempengaruhi adalah waktu, karena konsentrasi merupakan salah satu fungsi dari kecepatan reaksi. Laju suatu reaksi kimia dipengaruhi oleh konsentrasi. Pada konsentrasi tinggi laju reaksi lebih cepat, dan sebaliknya. Oleh karena itu larutan asam sulfat dengan pH di atas 4 bukan berarti tidak menyebabkan reaksi pelapukan, namun reaksinya lambat sehingga terlihat seolah-olah tidak bereaksi. Observasi terhadap batu yang dibiarkan tertutup abu harus diteruskan, meskipun saat ini tidak terlihat mungkin pada jangka panjang dapat teramati. Waktu juga harus diperhatikan dalam pelaksanaan pembersihan abu vulkanik yang mengenai candi. Pada prinsipnya semakin cepat dibersihkan makin baik, karena semakin lama abu vulkanik dibiarkan berkontak reaksi yang lambat tersebut dapat berlangsung.

V. KESIMPULAN

Kesimpulan yang dapat diambil pada kajian ini adalah:

1. Permukaan batu Candi Borobudur yang diobservasi secara visual tidak mengalami perubahan yang signifikan akibat dampak erupsi Gunung Merapi. Kenampakan permukaan batu candi pada awalnya mengalami perubahan terlihat seolah lebih putih, setelah hujan beberapa kali terlihat seolah seperti batu baru dan agak kemerahan, namun hal ini tidak berlangsung lama. Saat ini kenampakan permukaan batu sama dengan kondisi sebelum terkena erupsi.
2. Permukaan batu yang dibiarkan tertutup abu vulkanik setelah diobservasi menunjukkan tidak mengalami perubahan kenampakan, warna, maupun kekerasan permukaan. Hasil observasi setelah 6 bulan dan 12 bulan menunjukkan kondisi yang sama.
3. Hasil simulasi di laboratorium dengan cara merendam sampel batu andesit dalam larutan abu vulkanik dari Gunung Merapi menunjukkan tidak mengalami perubahan yang signifikan secara mikroskopis, kimia,

dan petrografi (mineralogi).

4. Simulasi dengan larutan asam sulfat berbagai konsentrasi memberikan informasi yang cukup baik untuk menggambarkan kemungkinan dampak material vulkanik terhadap batu andesit. Hasil percobaan menunjukkan batu mengalami perubahan kimia, mikroskopis, dan mineralogi pada pH 3, dan mulai menampakkan perubahan pada pH 4.
5. Hasil observasi lapangan terhadap beberapa candi yang pernah terkena dampak material erupsi gunung merapi menunjukkan adanya dampak, meskipun secara material tidak terlalu serius. Dampak yang dapat teramati di hampir semua situs adalah terbentuknya endapan berwarna merah pada permukaan batu, beberapa kerusakan seperti retak dan pecah, serta menurunnya kekerasan permukaan (skala Mohs). Namun menurunnya kekerasan permukaan belum menggambarkan terjadinya pelapukan batu, karena pengukuran skala Mohs dengan cara gores sering bias

jika diaplikasikan pada batu yang lama terpendam. Permukaan batu tertutup lapisan lunak dari tanah, sehingga yang tergores adalah permukaan lapisan tersebut dan bukan mencerminkan kekerasan batu. Secara umum candi yang pernah terkena dampak material erupsi gunung merapi menunjukkan tidak adanya dampak pelapukan material yang signifikan.

DAFTAR PUSTAKA

- Aja S U, (200), *Soils: Chemical Transformations During Weathering and Soil Formation*, Wheathering Soil Lab
- Balai Konservasi Peninggalan Borobudur, (2010), *Laporan Tanggap Darurat Pembersihan Abu Vulkanik Akibat Erupsi Gunung Merapi pada Candi Borobudur*, Borobudur
- Curran J, Smith B, Warke P, (2002), Weathering of Igneous Rock During Shallow Burial in an Upland Peat Environment: Observation from the Bronze Age Copney Stone Circle Complex, Northern Ireland, *Catena Journal* 49 (139-155)
- Iwasaki Iwaji, Yoshiike Yuzo, Yoshida Seiko and Ohmori Teiko, (1975), *Studies By The Dynamic Method On The Reaction Of Rock With Hot Spring Water Of The Tamagawa Hot Springs In Japan*, Publication n° 119 of the International Association of Hydrological Sciences Proceedings of the Grenoble Symposium
- Kovacs T, (2009), *Durability of Crystalline Monumental Stone in Terms of Their Petrophysical Characteristics*, Science for Conservation PhD Thesis Universita di Bologna
- Li-Jun L, Jiann-Neng F, Huann-Jih L, Sheng-Rong S, Chi-Yu L, Yaw-Lin C, (2002), Processes of Hydrothermal Alteration of Andesite, *Western Pacific Earth Sciences Vol. 2, No.3* P.319-330
- Parkani, (1999), *Archaeological Chemistry*, Bradshaw & Co, London
- Plendleith, H.J., 1957, *The Conservation of Antiquities and Work of Art*, Oxford University Press, London
- Stambolov. T, van Asperen de Boer. J.R.J, (1976), *The Deterioration and Conservation of Porous Building Materials in Monuments*, International Center for the Study of The Preservation and the Restoration of Cultural Property, Rome
- Torraca. G, (1982), *Porous Building Material – Material Science for Architectural Conservation*, ICCROM, Italy
- Wahyuni, Endang Tri, (2011), *Pelapukan Material Batu Candi Karena Dampak Erupsi Merapi*, Menyelamatkan Candi Borobudur dari Erupsi Merapi 2010, Buku terbitan Balai Konservasi peninggalan Borobudur